

基于非线性非仿射模型的直流微电网电压控制方法

宫瑞邦¹, 蒋琪², 王宇晨¹, 张葆青³

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 华北电力
大学 高压与电磁兼容北京重点实验室, 北京 102206)

摘要:提出了由光伏、储能、恒电阻负载和恒功率负载组成的直流微电网新型电压调节和最大功率点跟踪控制方法。该方法建立了具有非仿射输入的多输入多输出非线性直流微电网系统的动态模型。在此非线性动态模型的基础上,利用输出调节理论设计了局部状态反馈控制器,通过调节电压来规定设定值,使光伏功率输出达到最大。利用无源系统理论和李雅普诺夫稳定性理论研究了非仿射系统的全局设定值调节问题。在光照和负载同时发生变化的情况下,通过仿真验证了所提控制方案的有效性。

关键词:直流微电网;电压调节;非线性输出调节;被动型控制器设计

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22675

Voltage Control for DC Microgrid Based on Nonlinear Non-affine Model

GONG Ruibang¹, JIANG Qi², WANG Yuchen¹, ZHANG Baoqing³

(1. State Grid Xinjiang Company Limited Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. State Grid Xinjiang Company Limited, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
3. Beijing Key Laboratory of High Voltage & Electromagnetic, North China
Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A novel voltage regulation and maximum power point tracking (MPPT) control for DC microgrid composed of PV panel, battery, constant resistance and constant power loads was proposed. A dynamic model of the DC microgrid system described by a multi-input and multi-output nonlinear system with non-affine inputs was derived. Based on this nonlinear dynamic model, a local state feedback controller was designed used output regulation theory, which can regulate voltages to prescribe set points and maximize PV power output. The global set point regulation of non-affine systems was also studied by using passive system theory and Lyapunov stability theory. The effectiveness of the proposed control schemes was investigated using simulations when changes in both illumination and load.

Key words: DC microgrid; voltage regulation; nonlinear output regulation; passivity-based controller design

直流微电网集成了本地直流发电机和负载,在建筑、数据中心、飞机和特殊用途中,比交流电力系统更具优势^[1-2]:1)在直流分布式电源和直流负荷较多的供电区域,直流微电网有利于直流电源和负荷接入,大幅减少直/交流或交/直流变流器,从而提高系统效率;2)更高的可靠性;3)由于减少了变流器的数量,投资成本也大幅下降;4)降低了控制系统的复杂性。直流微电网有两种

工作状态:并网模式和孤岛模式。目前,直流微电网面临的挑战包括^[3]:难以同时实现电压调节和功率分配;恒功率负荷可能导致系统不稳定。这些挑战主要是由于直流微电网接入可再生能源、储能和非线性负荷造成的。

分层控制是目前比较流行的微网控制方法^[4],每个控制层都有不同的响应时间尺度和目标^[5],如文献[6]中提出的电压下垂控制。但下垂

控制也存在一些明显的缺点,如当分布式电源传输线阻相差较大时,功率分配精度较差,难以与其他分布式电源协调控制,甚至导致系统不稳定^[7]。针对下垂控制的缺点,文献[8-10]给出多种解决方法,主要有自适应控制、分布式控制、监测控制和依赖通信型控制等。然而,上述控制方法均存在一定缺陷性。

另一方面,光伏和恒功率负荷等非线性器件也会引起微电网的不稳定。文献[11-13]对光伏引起的微网稳定性问题进行了深入分析,并提出相应的解决方法。文献[11]针对孤岛式直流微电网,提出了一种分散自主电压控制方案;文献[12]提出了一种新型串联稳压器,用于控制径向直流微电网的直流母线电压,用于电压跟踪;对于恒功率负荷造成的稳定性问题,控制方法主要有主动阻尼法、被动阻尼法和滑模控制法,文献[13]采用被动阻尼来稳定恒功率负载。上述研究代表了在非仿射控制输入的非线性直流微电网的建模和控制方面的研究成果^[14]。系统稳定性、电压调节和性能权衡是直流微电网的固有特性,必须在同一理论框架下进行研究,为系统设计、实施和运行提供指导。

基于此,本文建立了直流微电网的综合分析模型,其中,负载为恒功率负载和阻性负载的组合。光伏发电的输出将在任何时候都最大化,以达到最佳的发电效率。为了实现电压调节,基于直流微电网的非线性非仿射模型,提出了两种不同的方法。首先,讨论了非线性输出调节理论,并应用推导了一种跟踪电压设定值的局部控制器;其次,利用非仿射系统的无源系统理论^[15]设计非线性设定值调节控制器;最后,通过 Matlab 仿真验证了所提控制器的性能。

1 直流微电网结构及建模

图1为直流微电网的结构图。直流微电网由1个光伏、1个储能、多个DC/DC转换器和2个不同电压水平运行的负载组成。负载母线和直流母线通过电力传输线连接,其线路电阻为 R_L 。DC/DC降压变换器和下游电阻性负载(R_2)共同构成了一个可控负载,其中的功率可以通过改变负载终端电压来改变。本文将负载端电压调节为定值,使DC/DC变换器和阻性负载模拟一个恒功率负载进行研究。上述直流微电网的等效电路图如图2所示。

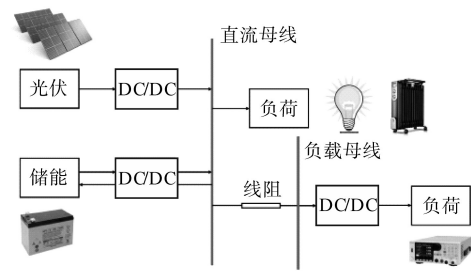


图1 直流微电网的结构图

Fig.1 The DC microgrid system configurations

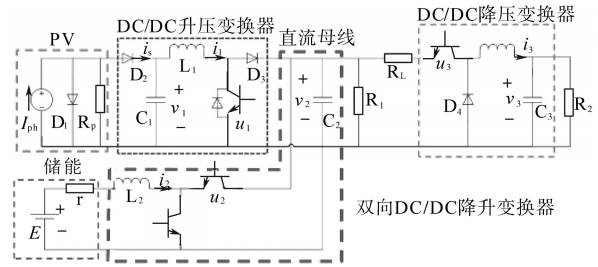


图2 直流微电网的等效电路图

Fig.2 The circuit of DC microgrid system

如图2所示,图中三个变换器的占空比 u_i 均需满足以下约束条件:

$$0 \leq u_i \leq 1 \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

晶体管开关的输入信号为 $1 - u_i$ 。当 $u_i = 0$ 时,关闭晶体管开关;当 $u_i = 1$ 时,晶体管开关打开。 u_1 控制PV的功率输出; u_2 控制直流母线电压,对电池进行充放电; u_3 控制负载电压。

根据基尔霍夫定律,图2中的直流微电网动态模型由微分方程描述如下:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = v_1 - v_2(1 - u_1) \quad (2)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = i_s - i_1 = I_{ph} - I_0(e^{a v_1} - 1) - \frac{v_1}{R_p} - i_1 \quad (3)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = E - i_2 r - v_2 u_2 \quad (4)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = i_1(1 - u_1) + i_2 u_2 - \frac{v_2}{R_1} - i_3(1 - u_3) \quad (5)$$

$$L_3 \frac{di_3}{dt} = [v_2 - i_3(1 - u_3)R_L](1 - u_3) - v_3 \quad (6)$$

$$C_3 \frac{dv_3}{dt} = i_3 - \frac{v_3}{R_2} \quad (7)$$

式中: a 为控制系统参数,本文取值为0.767; I_0 为输入电流。

式(2)~式(7)的约束条件为: v_2, v_3, i_3 均大于0。

令 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [i_1, v_1, i_2, v_2, i_3, v_3]^T$,式(2)~式(7)可改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L_1} [x_2 - x_4(1 - u_1)] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C_1} [I_{ph} - I_0(e^{ax_2} - 1) - \frac{x_2}{R_p} - x_1] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{L_2} (E - rx_3 - x_4u_2) \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{C_2} [-\frac{x_4}{R_1} + x_1(1 - u_1) + x_3u_2 - x_5(1 - u_3)] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{L_3} [-x_6 + x_4(1 - u_3) - R_Lx_5(1 - u_3)^2] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{C_3} (x_5 - \frac{x_6}{R_2}) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)的约束条件为: x_4, x_5, x_6 均大于0。计算式(8)可得:

$$\begin{cases} x_1^* = \frac{R_1 + R_2 + R_L}{R_1 R_2} x_6^* \\ x_2^* = x_4^* = \frac{R_2 + R_L}{R_2} x_6^* \\ x_3^* = \frac{E}{r} \\ x_5^* = \frac{x_6^*}{R_2} \end{cases} \quad (9)$$

$$I_{ph} - I_0(e^{ax_2^*} - 1) - x_2^*/R_p - x_1^* = 0 \quad (10)$$

式中:上标“*”代表变量参考值。

将式(9)中的 x_1^* 和 x_2^* 代入式(10)可得:

$$F(x_6^*) = I_{ph} - I_0(e^{abx_6^*} - 1) - (\frac{b}{R_p} + \frac{b}{R_1} + \frac{1}{R_2})x_6^* = 0 \quad (11)$$

其中, $b = (R_2 + R_L)/R_2$,且函数单调递减。因此,式(11)具有唯一解 $x_6^* \in (0, +\infty)$ 。

定义 $\bar{x} = x - x^*$,把系统的平衡点平移到原点,则状态方程表示为

$$\dot{\bar{x}} = f(\bar{x}, u) \quad (12)$$

控制目标是使光伏的输出功率最大化,同时调节直流母线和负载电压到设定值。为了确保光伏的最大输出功率,需满足:

$$P = [I_{ph} - I_0(e^{av_1} - 1) - \frac{v_1}{R_p}]v_1 \quad (13)$$

由于 P 是连续的,且只依赖于 v_1 ,故其最大值是通过解以下方程来确定的:

$$aI_0v_1e^{av_1} + I_0e^{av_1} + \frac{2}{R_p}v_1 = I_{ph} - I_0 \quad (14)$$

由于式(14)左侧的非线性函数具有单调递增特

性,故对于给定的一组系统参数 I_{ph}, I_0, a 和 R_p ,可以通过各种数值求解器直接从式(14)非线性代数方程离线求解最大功率点。换言之,不存在迭代问题,也不存在数值不稳定性问题。式(14)的解 $v_1 = v_1^*$ 可实现最大PV功率输出。总之,控制目标是 $v_1 \rightarrow v_1^*, v_2 \rightarrow v_2^*, v_3 \rightarrow v_3^*$ 。

2 直流微电网电压调节与被动控制策略设计

2.1 非线性输出调节理论与应用

考虑一个含非仿射输入 (u, ω) 的非线性系统,可由微分方程建模为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, \omega) \\ \dot{\omega} = S(\omega) \\ e = h(x, \omega) \end{cases} \quad (15)$$

式中: x 为状态变量; u 为控制输入量; ω 为扰动信号; e 为系统实际输出与参考输出间的误差。

假设 $f(x, u, \omega), S(\omega)$ 和 $h(x, \omega)$ 对 $f(0, 0, 0) = 0, S(0) = 0$ 和 $h(0, 0) = 0$ 是光滑的,状态反馈调节输出的问题可以表述为

$$\begin{cases} u = \beta(x, \omega) \\ \beta(x, \omega) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

从而实现以下两个控制目标:1)当 $\omega = 0$ 时,闭环系统是内部稳定的,即系统 $\dot{x} = f(x, u, \omega)$ 在平衡 $x = 0$ 处局部渐近稳定;2)当 $\omega \neq 0$ 时,有一个邻域 $U(x, \omega) = (0, 0)$ 包含在 $X \times W$ 矩阵中,使闭环系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f[x, \beta(x, \omega), \omega] \\ \dot{\omega} = S(\omega) \end{cases} \quad (17)$$

满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} h[x(t), \omega(t)] = 0$ 对于所有的初值 $[x(0), \omega(0)] \in U$,即误差信号渐近收敛于零。考虑到这一点,直流微网系统(式(12))的电压调节可以通过输出调节框架表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(\bar{x}, u) + P(\bar{x})\omega \\ \dot{\omega} = S(\omega) = 0 \\ e = h(x, \omega) = H(\bar{x}) + Q(\omega) \end{cases} \quad (18)$$

故控制器设计为

$$u = c(\omega) + K[\bar{x} - \pi(\omega)] \quad (19)$$

式中: $P(\bar{x}), H(\bar{x}), Q(\omega)$ 为控制器增益设计变量; π 为控制器函数。

矩阵 K 的元素都很小,以保证 $0 \leq u \leq 1$ 。如果某些状态不可用于反馈,则通过将矩阵 K 中的对应列设为零,可以得到部分状态反馈。输出调节方法可以使用更少的状态,从而减少对系统中

附加传感器的要求,降低了成本,提高了整个系统的可靠性和弹性。如果控制器的所有状态都是可用的,基于输出调节理论的控制设计方法也将提供良好的性能。图3给出了输出调节控制方案的框图,满足一致性定理:

$$[x_2 \ x_4 \ x_6]^T \rightarrow [v_1^* \ v_2^* \ v_3^*]^T \quad (20)$$

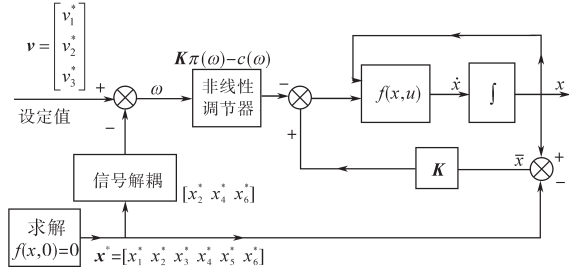


图3 输出调节控制方案框图

Fig.3 Block diagram of the output regulation control scheme

2.2 被动控制策略设计

在2.1节中,设计了一个基于非线性输出调节理论的控制。然而,非线性输出调节方法只有当系统工作在稳态工作点附近或在平衡点附近时才有效。因此,当状态突然偏离稳态工作点时,可能无法实现设定点调节。为了保证一个大的吸引域,现在使用在文献[15]中开发的被动系统法来设计控制器。在本节中,采用被动性低增益控制策略去实现直流微电网系统的设定值调节问题。首先,定义一个稳定问题如下: $\tilde{x}_i = x_i - x_i^{**}$, $\tilde{u}_j = u_j - u_j^*$, i 和 j 取值为正整数, x_i^{**} 和 u_j^* 分别为系统稳态状态值和控制值。 $\tilde{u}_j(\tilde{x})$ 为控制信号 u 与 $\tilde{u}(0) = 0$ 时稳态控制信号 u^* 的区别。平移后的直流微电网可以表示为多项式输入系统如下:

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{f}_0(\tilde{x}) + \tilde{g}_0(\tilde{x})\tilde{u} + \tilde{g}_{33}(\tilde{x})\tilde{u}_3^2 \quad (21)$$

其中

$$\tilde{g}_{33}(\tilde{x}) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{R_L}{L_3}(\tilde{x}_5 + x_5^{**}) \ 0]^T$$

$\tilde{g}_{i,i_2}(\tilde{x}) = 0$ 在除了 $i_1 i_2 = 33$ 时均成立。

当电池内部电阻 $r = 0$ 时,得到正定径向无界李雅普诺夫函数为

$$V(\tilde{x}) = \frac{1}{2}L_1\tilde{x}_1^2 + \frac{1}{2}C_1\tilde{x}_2^2 + \frac{1}{2}L_2\tilde{x}_3^2 + \frac{1}{2}C_2\tilde{x}_4^2 + \frac{1}{2}L_3\tilde{x}_5^2 + \frac{1}{2}C_3\tilde{x}_6^2 \quad (22)$$

满足下式:

$$L_{f_0}V(\tilde{x}) = -\frac{\tilde{x}_2^2}{R_p} - I_0 e^{a\tilde{x}_2} (e^{a\tilde{x}_2} - 1)\tilde{x}_2 - \frac{\tilde{x}_4^2}{R_1} - R_L\tilde{x}_3^2 - \frac{\tilde{x}_6^2}{R_2} \leq 0 \quad (23)$$

式中: L_{f_0} 为拉格朗日算子。

这是因为 $a, I_0 e^{a\tilde{x}_2}$ 均为正常数,且 $(e^{a\tilde{x}_2} - 1)\tilde{x}_2 \geq 0$ 。因此,直流微电网在 $\tilde{u} = 0$ 是全局稳定的。此外,值得注意的是:

$$[L_{\tilde{g}_0}V(\tilde{x})]^T = \begin{bmatrix} v_2^*\tilde{x}_1 - x_1^{**}\tilde{x}_4 \\ -v_2^*\tilde{x}_3 + x_3^{**}\tilde{x}_4 \\ x_5^{**}\tilde{x}_4 - v_2^*\tilde{x}_5 + 2R_L(1 - v_3^*)(\tilde{x}_5 + x_5^{**})\tilde{x}_5 \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: $L_{\tilde{g}_0}$ 为拉格朗日算子转置。

接着,简单计算可得 $L_{\tilde{g}_0}V(\tilde{x}) = 0 \rightarrow \tilde{x} = 0$,这表明非仿射直流微电网可由有界反馈控制律实现全局渐近稳定:

$$\tilde{u}(\tilde{x}) = -\alpha(\tilde{x}) \frac{[L_{\tilde{g}_0}V(\tilde{x})]^T}{1 + \|L_{\tilde{g}_0}V(\tilde{x})\|^2} \quad (25)$$

式中: $\alpha(\tilde{x})$ 为控制律。

3 仿真分析

在本节中,我们对上述两种电压调节方法进行仿真研究。仿真平台为 Matlab/Simulink,直流微电网的参数如下: $L_1=L_2=L_3=5$ mH; $C_1=200$ μ F, $C_2=2\ 000$ μ F, $C_3=300$ μ F; $R_1=144$ Ω , $R_2=9$ Ω , $R_p=10^6$ Ω , $R_L=10$ Ω , $r=1$ Ω ; $E=48$ V;库伦常数 $q=1.6 \times 10^{-19}$, $k=1.38 \times 10^{-23}$, $a=0.767$, $I_0=10^{-9}$ A, $\beta=0.05$; v_2, v_3 的参考值为 $[v_2^* \ v_3^*]=[120 \ 28]$,单位V。

3.1 非线性调节控制器的仿真验证

设定两个仿真案例,一个是太阳辐照度变化而负荷不变,另一个是负荷随太阳辐照度的变化而变化。

3.1.1 仅光照发生变化情况

在模拟中,太阳辐照度在其他参数不变的情况下,按照如下模式变化:在 $t = 0$ s时,直流微电网处于稳态,PV通过MPPT控制产生电流 I_{ph} ,电流 $I_{ph} = 9$ A,PV输出电压 $V_{pv} = 35.77$ V,PV功率 $P = 306.5$ W;在 $t = 0.2$ s时,光照强度减小, I_{ph} 也减小,当 I_{ph} 降至4 A,基于MPPT控制的PV输出电压 V_{pv} 降至34.38 V,PV功率降至130.7 W;在 $t = 0.4$ s时,突然出现光照缺失, $I_{ph} = 0$,在这种情况下,PV输出电压功率也应该降为零;从 $t = 0.6$ s到 $t = 0.8$ s,太阳辐照度逐渐恢复。比较方法为线性反馈控制与非线性反馈控制。

图4~图6为基于PI控制方法的仿真结果图。其中, I_{ph}, I_{pv}, V_{pv} 分别为电流源电流、光伏输出电流和光伏输出电压; I_{bat}, V_b, I_L 和 V_L 分别为储能输出

电流、直流母线电压、电感电流和电感电压; u_1, u_2 和 u_3 分别为变流器1~3的占空比。

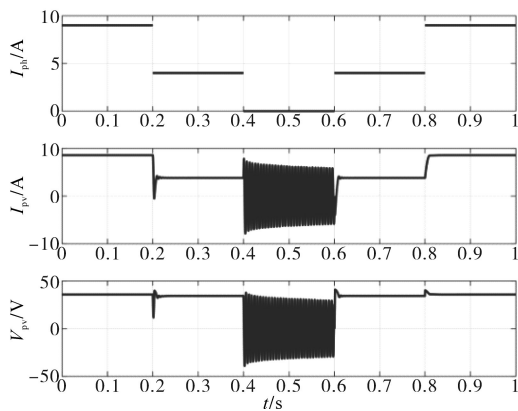


图4 PI控制效果图

Fig.4 Dynamic performance of PI control

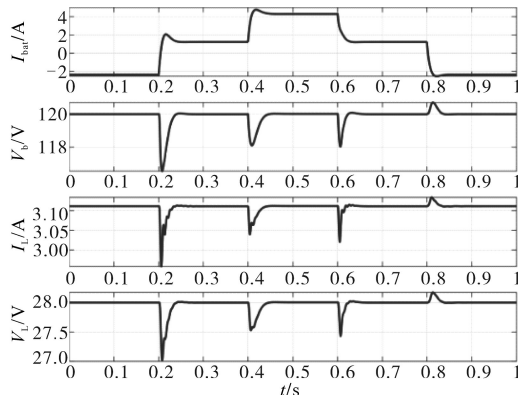


图5 PI控制下相关参数动态特性

Fig.5 Dynamic characteristics of parameters under PI control

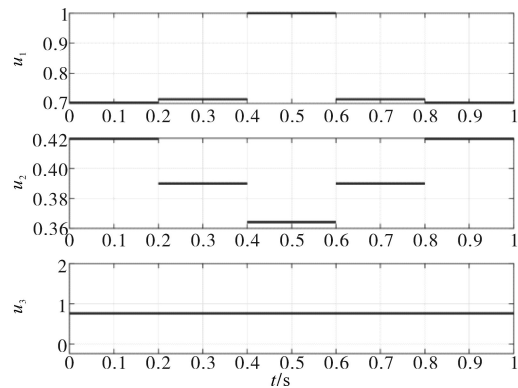


图6 占空比控制信号波形图

Fig.6 Waveforms of the duty cycle signals

通过分析图4~图6可得,由于有储能转换器,即使改变PV光照强度,直流母线电压恒定在120V。电池在 $t=0$ 时充电,随着PV输出功率下降而放电。由于直流母线电压是恒定的, u_3 是定值,以维持负载电压。由此可见,PI控制效果相对较差。在 $t=0.4$ s时,PV输出电压不能随着光照趋近于零而迅速降低,由于直流变流器上电感、电容的存在以及缺少分流电阻而产生振荡。光照变化

或其他扰动会对PV输出造成较大影响,这是因为扰动引起的系统振荡与直流母线电压波动有关。

图7~图9为基于非线性控制方法的仿真结果图。

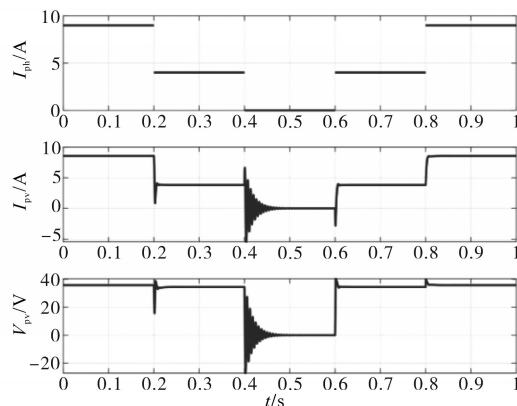


图7 非线性反馈控制效果图

Fig.7 Dynamic performance of nonlinear control

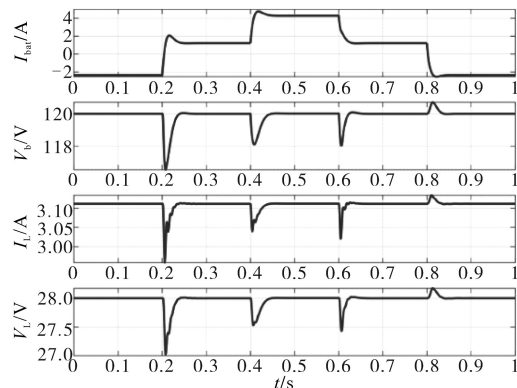


图8 非线性控制下相关参数动态特性

Fig.8 Dynamic characteristics of parameters under nonlinear control

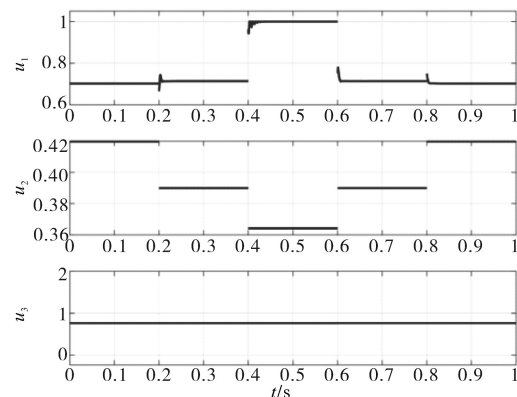


图9 非线性控制下占空比控制信号波形图

Fig.9 Waveforms of the duty cycle signals

u_1, u_2 and u_3 under nonlinear control

由图7~图9可以看出,在非线形反馈控制下,PV变流器可以显著降低振荡,使PV输出电压快速稳定。

直流母线电压主要由储能转换器控制,储能

变换器采用线性反馈调节直流母线电压。非线性反馈控制器(图9中的 u_1)仅在PV变换器中使用,而储能变换器(图9中的 u_2)和负载变换器(图9中的 u_3)使用相同的线性控制器(对比图6中的 u_2 和 u_3)。这就是两种控制方案下直流母线电压看起来相似的原因。

非线性反馈控制中矩阵 K 取值如下:

$$K = \begin{bmatrix} -0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

这里应用的控制器是部分状态反馈控制器,并且假设系统中只有一个状态 x_1 被测量。线性反馈和非线性反馈的主要区别在于PV输出电压和电流,即 V_{pv} 和 I_{pv} 分别如图4和图7所示。

3.1.2 负荷发生变化情况

本案例中,在太阳辐照度保持不变的情况下,负荷按如下模式变化: $t=0$ s时,直流微电网稳定运行,PV输出最大功率,电池正在充电; $t=0.2$ s时,母线负荷增加(R_1 从144 Ω 下降到60 Ω);在 $t=0.4$ s时,负荷突然增加(即通过将 R_2 从9 Ω 增加到15 Ω)。图10~图12为PI控制方法仿真结果图。

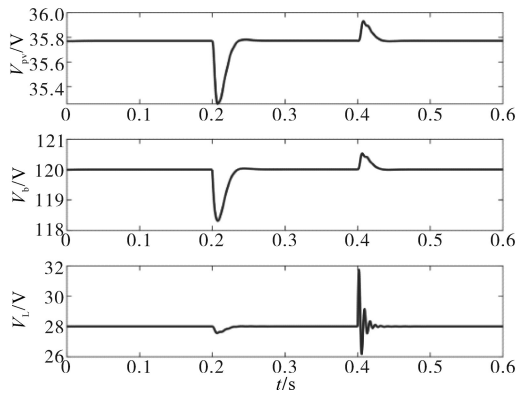


图10 PI控制下光伏电压、母线电压、负荷电压仿真波形

Fig.10 Simulation waveforms of V_{pv}, V_b, V_L under PI control

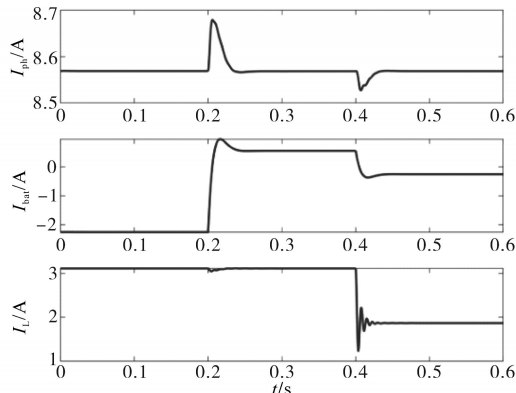


图11 PI控制下光伏电流、储能电流、负荷电流仿真波形

Fig.11 Simulation waveforms of I_{ph}, I_{bat}, I_L under PI control

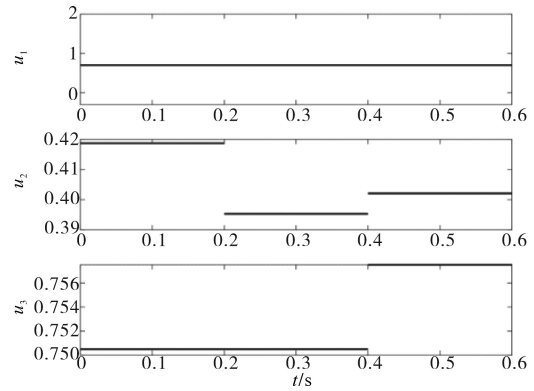


图12 占空比控制信号波形图(PI控制)

Fig.12 Waveforms of the duty cycle signals (PI control)

因为太阳辐照度是恒定的,所以PV被设定为在任何时候都能产生最大的能量。在 $t=0$ s时,系统处于稳态工作状态,电池正在充电;在 $t=0.2$ s时,随着负载的增加,电池放电以补偿功率平衡;随着 $t=0.4$ s时 R_2 的变化, u_3 也随之变化以保持负载电压,电池吸收额外的功率;在 $t=0.6$ s时,由于负载电压变化大于其标称值的10%,系统动态性能较差。图13~图15为非线性反馈控制法的仿真结果图。

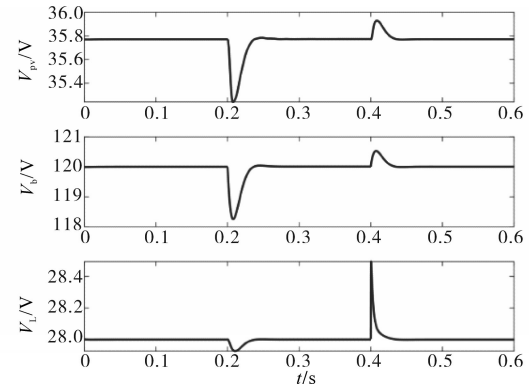


图13 非线性控制下光伏电压、母线电压、负荷电压

Fig.13 Simulation waveforms of V_{pv}, V_b, V_L under nonlinear control

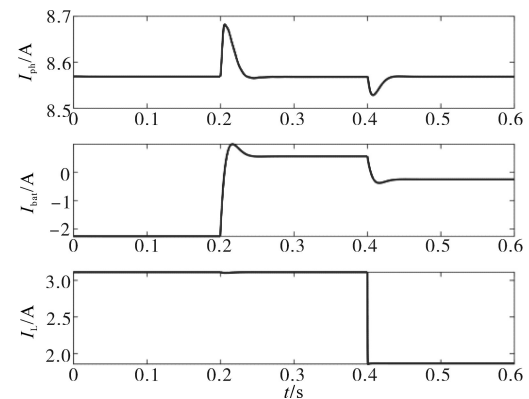


图14 非线性控制下光伏电流、储能电流、负荷电流

Fig.14 Simulation waveforms of I_{ph}, I_{bat}, I_L under nonlinear control

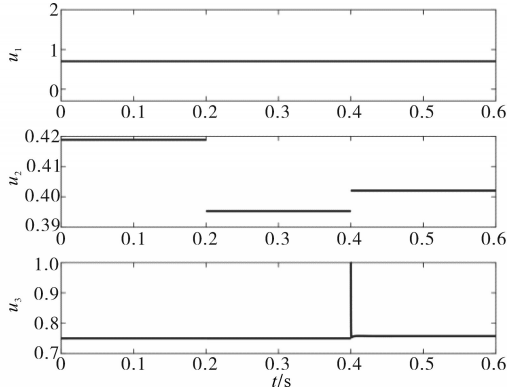


图15 占空比控制信号波形图(非线性控制)

Fig.15 Waveforms of the duty cycle signals (nonlinear control)

非线性反馈控制中矩阵K取值如下:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}$$

与图10~图12比较,在非线性反馈法下,负载电压和负载电流的瞬态性能得到了显著改善。

3.2 被动控制器的仿真验证

本节仿真中太阳辐照度等参数保持不变,PV的输出电流和电压的标称值(平移后)为零。在 $t=0$ 时,假设系统状态由于某种原因偏离其稳态值。 \tilde{x} 是偏离稳态的值, \tilde{x} 的初始条件是[5 10 5 10 5 10]。图16、图17为被动控制器的仿真波形。仿真结果证明了被动低增益控制器调节直流微电网的系统状态 $\tilde{x} = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \ \dots \ \tilde{x}_6]^T$ 到原点。

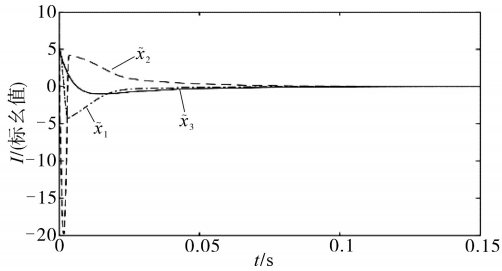


图16 闭环系统状态变量 $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ 的暂态响应特性

Fig.16 Transient response of the states $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ of the closed-loop system

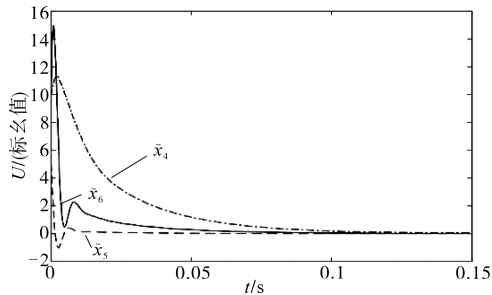


图17 闭环系统状态变量 $\tilde{x}_4, \tilde{x}_5, \tilde{x}_6$ 的暂态响应特性

Fig.17 Transient response of the states $\tilde{x}_4, \tilde{x}_5, \tilde{x}_6$ of the closed-loop system

同理,系统状态 v_1, v_2 和 v_3 实现了设定跟踪,而 i_1, i_2 和 i_3 在李雅普诺夫意义上全局稳定。其中, \tilde{x}_1, \tilde{x}_2 和 \tilde{x}_3 分别为PV的输出电流; \tilde{x}_4, \tilde{x}_5 和 \tilde{x}_6 分别为PV的输出电压。

4 结论

本文研究了含光伏、储能和恒阻恒功率负荷的直流微电网电压调节问题。建立了直流微电网的非线性非仿射动态模型。基于控制输入非仿射的模型,提出了两种非线性控制方案来实现电压调节。利用非线性输出调节器框架推导了一种电压调节控制器。由于输出调节器方法的限制,结果只是局部的。为了保证大范围的稳定性,我们使用了一种基于被动的设计方法,它能够实现全局设定值调节。推导出一种低增益、类似 $L_g V$ 的控制律,用于在各种运行条件下对直流母线和负载电压进行全局调节。通过Matlab仿真验证了所提出的两种非线性控制器的性能。以实际的直流微网参数进行仿真研究,验证了所提非线性控制策略的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 杨旭红,尹聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J].电气传动,2020,50(5):75-80.
Yang Xuhong, Yin Cong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [2] Anand S, Fernandes B G. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2017, 28(4): 1900-1913.
- [3] Backhaus S, Swift G W. DC microgrid scoping study opportunities and challenges[C]//IEEE First Int. Conf. on DC Microgrids (ICDCM), 2018:43-44.
- [4] Bidram A, Davoudi A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 3(4): 1963-1976.
- [5] Vuyyuru U, Maiti S, Chakraborty C, et al. A series voltage regulator for the radial DC microgrid[J]. IEEE Trans. on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 127-136.
- [6] Iovine A, Siad S B. Nonlinear control of a DC microgrid for the integration of photovoltaic panels[J]. IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2): 524-535.
- [7] Dragicevic T, Lu X, Vasquez J C, et al. DC microgrids part I: A review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2016, 31(7): 4876-4891.
- [8] Dragicevic T, Lu X, Vasquez J C, et al. DC microgrids part II:

(下转第50页)

[4] 杨荣峰,随顺科,徐榕,等.级联SVG控制策略及死区补偿技术研究[J].电机与控制学报,2014,18(10):36-41.
Yang Rongfeng, Sui Shunke, Xu Rong, *et al.* Research on cascaded SVG control strategy and dead-time compensation techniques[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(10): 36-41.

[5] 张勇军,姚智聪,王京,等.一种级联H桥型静止无功发生器电容电压平衡控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(27):4621-4628.
Zhang Yongjun, Yao Zhicong, Wang Jing, *et al.* A direct current capacitor voltage balancing control strategy for H-bridge cascaded static var generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4621-4628.

[6] 范其明,赵相宾,刘建强,等.三电平静止无功发生器补偿控制研究[J].电气传动,2020,50(6):53-59.
Fan Qiming, Zhao Xiangbin, Liu Jianqiang, *et al.* The research on compensation control for three-level static var generator[J]. Electric Drive, 2020, 50(6): 53-59.

[7] 王轩,熊超英,傅坚,等.链式静止同步补偿器动态模型建模方法[J].中国电机工程学报,2012,32(9):1-6,21.
Wang Xuan, Xiong Chaoying, Fu Jian, *et al.* Dynamic modeling of chain circuit STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 1-6, 21.

[8] 田铭兴,阎宏,赵雨欣.级联H桥SVG直流侧电容电压平衡控制方法[J].电网技术,2013,37(9):2632-2638.
Tian Mingxing, Yan Hong, Zhao Yuxin. A balancing control method of DC capacitor voltage for cascaded H-bridge SVG[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2632-2638.

[9] 贾永博.不平衡负载下SVG分序控制策略研究[J].电气传动,2020,50(11):47-53.
Jia Yongbo. Research on sequential control strategy of SVG under unbalanced load[J]. Electric Drive, 2020, 50(11): 47-53.

[10] Luo R, He Y, Liu J. Research on the unbalanced compensation of delta-connected cascaded H-bridge multilevel SVG[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8667-8676.

[11] Chen H, Wu P, Lee C, *et al.* Zero-sequence voltage injection for DC capacitor voltage balancing control of the star-connected cascaded H-bridge PWM converter under unbalanced grid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 4584-4594.

[12] 秦晓辉,苏丽宁,迟永宁,等.大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J].电力系统自动化,2018,42(9):36-43.
Qin Xiaohui, Su Lining, Chi Yongning, *et al.* Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43.

[13] 张波,张晓磊,贾焦心,等.基于惯量支撑和一次调频需求的VSG储能单元配置方法[J].电力系统自动化,2019,43(23):202-216.
Zhang Bo, Zhang Xiaolei, Jia Jiaoxin, *et al.* Configuration method for energy storage unit of virtual synchronous generator based on requirements of inertia support and primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 202-216.

收稿日期:2020-10-27

修改稿日期:2020-12-10

(上接第9页)

A review of power architectures, applications, and standardization issues[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2016, 31(5): 3528-3549.

[9] Liu Z, Su M, Sun Y, *et al.* Existence and stability of equilibrium of DC microgrid with constant power loads[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2018, 33(6): 6999-7010.

[10] Siad S B, Malkawi A. Nonlinear control of a DC microgrid for the integration of distributed generation based on different time scales[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 111(6): 93-100.

[11] Roy T K, Mahmud M A. Nonlinear adaptive backstepping controller design for islanded DC microgrids[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2018, 54(3): 2857-2873.

[12] Huang Po-Hsu, Liu Po-Chun, Xiao Weidong, *et al.* A novel droop-based average voltage sharing control strategy for DC microgrids[J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2018, 6(3): 1096-1106.

[13] Iovine A, Siad S B. Nonlinear control of a DC microgrid for the integration of photovoltaic panels[J]. IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, 2018, 14(2): 524-535.

[14] 张学,裴玮,邓卫,等.多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5553-5562.
Zhang Xue, Pei Wei, Deng Wei, *et al.* Energy management and coordinated control method for multi-source/multi-load DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5553-5562.

[15] Morstyn T, Savkin A V. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2018, 9(5): 4735-4743.

收稿日期:2020-11-15

修改稿日期:2020-12-09